

Determinación de las propiedades físicas de GJ 436b utilizando datos de tránsito y velocidad radial y estimación de los límites habitables para estrellas de baja masa.

DANIEL FELIPE VARGAS ARIAS

Noviembre 27 de 2023

Abstract

Desde la astronomía y la ciencia en general se ve como una tarea de suma importancia la exploración exoplanetaria y el análisis de habitabilidad de los exoplanetas como un método para entender mejor la vida en la Tierra, mejorar nuestras condiciones de vida y colonizar otras áreas del universo. Dicho esto en este trabajo vamos a estudiar los datos de fotometría y velocidad radial de la estrella Gliese 436 para estimar el periodo, el radio y la masa de su planeta GJ 436 b. Posteriormente se usará el modelo de Kopparapu (2013) de zonas de habitabilidad para estrellas de baja masa y el modelo de masa-luminosidad de Duric (2004) para calcular los límites de habitabilidad para estrellas de baja masa, comparar si es consistente con las actuales órbitas de los planetas del Sistema Solar y comprobar si GJ 436 b está dentro de la zona habitable de su estrella.

1 Introducción

La exploración planetaria ha sido uno de los retos de la astronomía desde la antigüedad. Desde los inicios de la ciencia nos hemos preguntado si nuestro mundo es único y al menos para la Tierra, ese misterio fue resuelto Aleksander Wolszcan y Dale Frail en 1992 cuando descubrieron el primer exoplaneta orbitando a PSR B1257+12, también llamado Lich, un púlsar ubicado a 2315 años luz. Al tratarse de un púlsar y no de una estrella de secuencia principal como el Sol, este descubrimiento dejó un sabor agri dulce

que fue saldado en 1995 por Didier Queloz y Michel Mayor cuando descubrieron un planeta alrededor de 51 Pegasi a 50 años luz de la Tierra.

Desde entonces la investigación en ciencias planetarias tuvo su auge y se puso en el centro de la astrobiología, la rama de la astronomía que trata de descifrar las condiciones y las posibilidades de que exista vida extraterrestre y de que nuestra pueda adaptarse a un ambiente extraterrestre. Si bien los planetas de Lich fueron descubiertos debido a fluctuaciones en las pulsaciones intrínsecas del púlsar, este método no funciona para encontrar planetas alrededor de estrellas de secuencia principal, por eso los astrónomos han buscado métodos para encontrar planetas de manera eficiente. En la actualidad, existen varios métodos de detección de planetas extrasolares, sin embargo dos de ellos son, con diferencia, los más eficientes son el método de velocidad radial, que consiste en medir la fluctuación periódica del efecto Doppler en una estrella, lo que implicaría la presencia de un planeta orbitando generando interacción gravitacional. 51 Pegasi b fue descubierto utilizando este método. El otro método es el método de tránsito que consiste en medir la disminución periódica del brillo de una estrella que sería ocasionada por un planeta que lo transita y cubre una parte de su luz. Estos métodos se ilustran en la figura 1. Más allá de encontrar planetas, la misión de las ciencias planetarias es estudiar las condiciones de habitabilidad de las estrellas, que muchas veces se traduce a la posibilidad de que exista acumulaciones de agua líquida en su superficie en

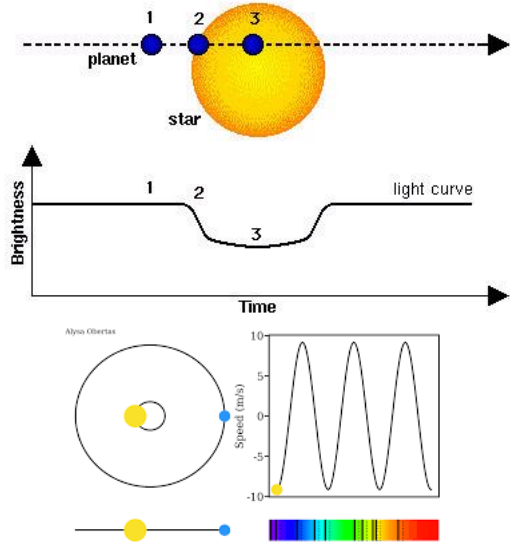


Figura 1: a.) Método de tránsito b.) Método de velocidad radial.

las que se pueda crear las condiciones para que haya química compleja. Esta es una condición necesaria pero no suficiente, la presencia de agua líquida, creemos, es vital para la existencia de vida, pero el hecho de que exista agua líquida en la superficie no implica que haya vida, hay varios lugares del sistema solar donde existe agua líquida y no hasta ahora no hemos encontrado vida allí, de ahí a que existan otros factores para considerar habitable un planeta como la presencia de atmósfera y de actividad geológica, sin embargo en esta investigación trataremos los límites orbitales de habitabilidad estelar. Existen varios límites, que se basan en la estabilidad del agua líquida:

-Recent Venus: Es la órbita en la cual hay un flujo estelar como el que tenía Venus hace 1 Gyr, cuando se cree que tenía agua líquida.

-Runaway Greenhouse: Es la órbita en la cual toda el agua líquida de la superficie se evaporaría y se disociaría debido al efecto invernadero ocasionado por retroalimentación positiva.

-Moist Greenhouse: Es el punto en que el agua superficial comienza a evaporarse.

-Maximum Greenhouse: Distancia máxima a la que se emezarían a formar nubes de CO₂ y mantener una temperatura de 273.15 K donde inicia la congelación del agua superficial.

-Early Mars: Es un límite optimista basado en el hecho de que Marte tenía agua líquida hace 3.8 Gyr.

Con esto presente, vamos a utilizar los datos de fotometría y espectrometría de la estrella Gliese 436 almacenados en el NASA Exoplanet Archive para calcular el radio y la masa de su planeta GJ 436 b. Posteriormente aplicaremos el modelo de Kappapapu, et al (2013), para calcular los límites de habitabilidad planetaria para estrellas de entre 0 y 2 \odot .

2 Determinación de las propiedades físicas de GJ 436 b.

2.1 Determinación de la masa por análisis espectrométrico.

Para determinar la masa del planeta conociendo su velocidad radial usamos la ecuación:

$$K_1 = \frac{28.43 \frac{m}{s}}{\sqrt{1-e^2}} \frac{M_p \sin i}{M_{\text{Jup}}} \left(\frac{M_p + M_*}{M_{\odot}} \right)^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{P}{1 \text{ yr}} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (1)$$

Donde es claro que

$$M_* + M_p \approx M_* \quad (2)$$

Y por tanto la ecuación puede aproximarse a

$$K_1 = \frac{28.43 \frac{m}{s}}{\sqrt{1-e^2}} \frac{M_p \sin i}{M_{\text{Jup}}} \left(\frac{M_*}{M_{\odot}} \right)^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{P}{1 \text{ yr}} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (3)$$

Utilizando la ecuación 3 podemos despejar la $M_p \sin(i)$ como:

$$M_p \sin(i) = \frac{K_1 \sqrt{1-e^2}}{28.43 \frac{m}{s}} \left(\frac{M_*}{M_\odot} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{P}{1yr} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

por lo general no se conoce la inclinación de la órbita (i) así que la masa del planeta se expresa en términos de su masa mínima, esto es, cuando $i = \frac{\pi}{2}$ y su expresión queda como:

$$M_{min} = \frac{K_1 \sqrt{1-e^2}}{28.43 \frac{m}{s}} \left(\frac{M_*}{M_\odot} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{P}{1yr} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

Los datos de velocidad radial usados fue la concatenación de tres archivos de datos de espectro óptico Butler, et al (2004), Butler, et al (2006) y Maness, et al (2007). Todos estos datos se obtuvieron por análisis espectrométrico de datos fotométricos anteriores. A estos datos se les hizo un periodograma utilizando un algoritmo lomb-scargle para encontrar su periodo. Este periodo fue usado para poner estos datos en fase y posteriormente aplicar un ajuste sinusoidal a ellos utilizando la función *curve_fit* de *Scipy* de la forma:

$$K = a \sin(bx + c) + d \quad (6)$$

Luego de realizar el ajuste, se toman el valor mínimo y el valor máximo de este para hallar K_1 como:

$$K_1 = \frac{K_{max} - K_{min}}{2} \quad (7)$$

Conociendo ya, el K_1 , teniendo los datos de masa de la estrella y excentricidad y periodo del planeta podemos aplicar la ecuación 5 para calcular la masa mínima del planeta.

2.2 Determinación del radio del planeta por análisis fotométrico.

Para determinar el radio del planeta con datos de tránsito aplicamos la ecuación de cambio de velocidad para el tránsito que tiene la forma:

$$\frac{\Delta L}{L_*} = \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2 \quad (8)$$

de donde podemos despejar R_p como:

$$R_p = R_* \sqrt{\frac{\Delta L}{L_*}} \quad (9)$$

Conocemos los datos de R_* y L_* desde la literatura. Para hallar ΔL tomamos los datos de fotometría de Gillion, et al (2007) obtenidos por el *OFXB 0.6m telescope* ubicado en St-Luc, Suiza. Estos datos son puestos en fase utilizando el periodo anteriormente conocido y se realiza un ajuste constante por secciones, una para la sección superior, donde no hay tránsito y otra para la sección superior donde se da el tránsito. Posteriormente restamos estos valores para tener ΔL y con esto aplicar la ecuación 9 para hallar el radio del planeta.

2.3 Parámetros usados.

Los parametros usados para realizar los cálculos anteriores se encuentran en la tabla 1, todos dados en unidades del SI.

Masa G 436	8.948×10^{29}
Radio G 436	292194000
Luminosidad G 436	9.5675×10^{24}
Excentricidad GJ 436 b	0.15

Tabla 1: Parámetros físicos usados para los cálculos.

3 Determinación de la zona de habitabilidad de estrellas de baja masa.

Para calcular la distancia de los límites de habitabilidad para estrellas de secuencia principal utilizamos el modelo de Kopparapu, et al (2013), que dice que la distancia a cada uno de los límites se expresa como:

$$D = \sqrt{\left(\frac{L_*}{L_\odot S_{eff}} \right)} \text{ AU} \quad (10)$$

donde S_{eff} es el flujo estelar que está dado por:

$$S_{eff} = S_{eff\odot} + aT_*^2 + bT_*^2 + cT_*^3 + dT_*^4 \quad (11)$$

donde $S_{eff\odot}$ es el flujo del Sol y T_* es la temperatura de la estrella la cual está dada por:

$$T_* = T_{eff} - 5780K \quad (12)$$

donde T_* está dada por la ecuación 13, Tayler (1994):

$$T_{eff} = \left(\frac{L_*}{4\pi R_*^2 \sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (13)$$

Los parámetros $S_{eff\odot}$, a , b , c y d se encuentran para cada límite en la publicación de Kopparapu, et al (2013) y no se pondrán aquí por eficiencia del espacio.

3.1 Modelo de luminosidad estelar

La mayoría de modelos de luminosidad solar tiene una relación de la forma:

$$\frac{L_*}{L_\odot} = A \left(\frac{M_*}{M_\odot} \right)^a \quad (14)$$

donde los parámetros a y A varían dependiendo del modelo y del rango de masas de las estrellas. En este trabajo utilizaremos el modelo de Duric (2004) que tiene la forma:

$$\frac{L_*}{L_\odot} = \left(\frac{M_*}{M_\odot} \right)^4, \quad 0.43M_\odot \leq M_* \leq 2M_\odot \quad (15)$$

Con las anteriores ecuaciones ya tenemos todo para calcular la zona de habitabilidad de estrellas de baja masa. Para calcular estos límites vamos a suponer que se cumple:

$$\frac{M_*}{M_\odot} = \frac{R_*}{R_\odot} \quad (16)$$

ya que no conocemos el radio de las estrellas, supondremos una relación lineal entre la masa y el radio de las estrellas.

4 Resultados

4.1 Velocidad radial

Al importar los datos y obtener el periodo de ellos obtenemos un valor de $t_{GJ436b} = 2.64397873$ días.

Parámetro	Valor
a	-18.067
b	-2.257
c	3.666
d	-0.076

Tabla 2: Parámetros del ajuste sinusoidal utiliza

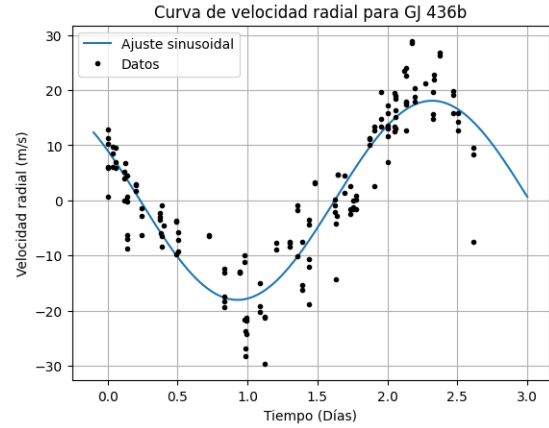


Figura 2: Ajuste sinusoidal y datos de velocidad radial.

Al aplicar la función *curve_fit* obtenemos los parámetros que se ven en la tabla 2. La función y la gráfica de dispersión se ven en la figura 2

Con estos parámetros tenemos el K_{min} y el K_{max} y podemos hallar el K_{mean} , estos resultados se ven en la tabla 3

4.2 Fotometría

Para la sección de fotometría, los datos y el ajuste se graficaron en la figura 3

4.3 Parámetros físicos de GJ 436 b

Los parámetros físicos hallados se ven en la tabla 4

4.4 Zonas de habitabilidad

Al extraer los parámetros habitabilidad y aplicar el modelo de Kopparapu (2013) obtenemos los resulta-

	$K_1 \left(\frac{m}{s} \right)$
K_{min}	-18.06716
K_{max}	18.06722
K_{mean}	18.06719

Tabla 3: Valores obtenidos de K_1

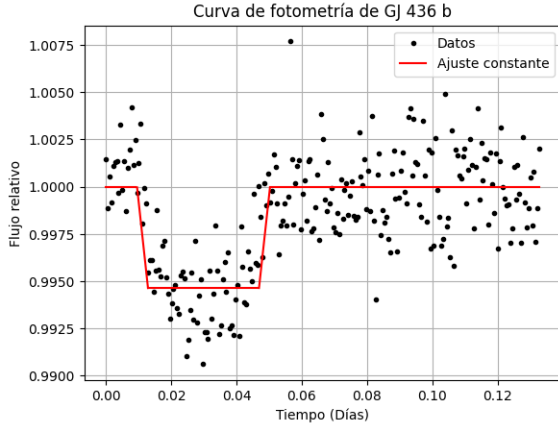


Figura 3: Ajuste por secciones y datos de fotometría.

Parámetro	Hallado	Literatura mínimo	Literatura máximo
Masa (M_{\oplus})	0.0713	0.0682	0.0801
Radio (R_{\oplus})	0.305	0.353	0.380

Tabla 4: Tabla de resultados.

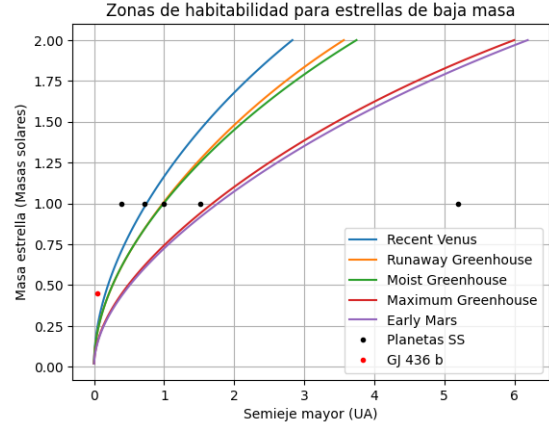


Figura 4: Zonas de habitabilidad para estrellas de baja masa

dos de la figura 4.

5 Conclusiones

Los resultados de los parámetros físicos de GJ 436 b son en general satisfactorios, la masa está entre los valores hallados en la literatura, mientras que los resultados del radio subestiman el radio del planeta. Esto puede deberse a a considerar un tránsito central, al ajustar los datos a una recta constante, esto subestimaría el tamaño del planeta porque un tránsito central es de mayor duración y de más bloqueo de flujo que uno no central por tanto un planeta más pequeño puede generar una disminución similar en un tránsito central que uno más grande en un tránsito no central. Según los parámetros obtenidos podemos afirmar que GJ 436 b con un poco más de 20 masas terrestres es un minineptuno caliente. El hecho de usar varios archivos de datos por la masa puede ser un arma de doble filo, por un lado aumenta la consistencia de los datos al tener

mayor cantidad, pero por otro lado, puede ser fuente de propagación de errores debido a que estos datos son hallados con instrumentos diferentes por equipos diferentes y al momento de hacer un periodograma, estos datos pueden no presentar el mismo periodo y desfazarse un poco. Sin embargo esto no fue motivo para que los resultados estuvieran dentro de los valores dados en la literatura.

Para los resultados de la zona de habitabilidad, vemos que el modelo usado se adapta bien a los planetas del sistema solar pues Venus yace casi sobre el límite de Recent Venus, Marte está muy cerca del límite de Early Mars y la Tierra está muy cerca del borde de Moist Greenhouse, donde las estimaciones actuales la ubican. También vemos que utilizando el modelo de Kopparapu, el planeta que se estudió en esta investigación GJ 436 b no está dentro de la zona de habitabilidad de Gliese 436, pues aunque esta estrella es pequeña, de casi la mitad de la masa del Sol, GJ 436 b órbita en menos de 3 días, lo que

aplicando la tercera ley de Kepler corresponde a un semieje mayor de $0.0422UA$, es decir muy cerca de su estrella, por lo que probablemente no tenga agua líquida en su superficie. Más allá de esto vemos que la zona de habitabilidad de una estrella es un parámetro nada fácil de definir y de que este puede estar en órbitas tan alejadas como la órbita de Júpiter si se cumplen las condiciones de luminosidad y masa de la estrella.

6 Referencias

- [1] Butler, R. P., et al. (2004). A Neptune-mass planet orbiting the nearby M dwarf GJ 436. *The Astrophysical Journal*, 617(1), 580.
- [2] Butler, R. P., et al. (2006). Catalog of nearby exoplanets. *The Astrophysical Journal*, 646(1), 505.
- [3] Duric, N. (2004). *Advanced astrophysics*. Cambridge University Press.
- [4] Gillon, M., et al. (2007). Detection of transits of the nearby hot Neptune GJ 436 b. *Astronomy Astrophysics*, 472(2), L13-L16.
- [6] Kopparapu, R. K., et al. (2013). Habitable zones around main-sequence stars: new estimates. *The Astrophysical Journal*, 765(2), 131.
- [5] Maness, H. L., et al. (2007). The M Dwarf GJ 436 and its Neptune-Mass Planet. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 119(851), 90.
- [6] Tayler, R. J. (1994). *The stars: their structure and evolution*. Cambridge University Press.

7 Anexos

- [1] <https://colab.research.google.com/drive/1Bln8JG-Wc1ZbXJ4TsiT1HrZ9zy9azYIN?authuser=2>
- [2] https://colab.research.google.com/drive/1G1CSXJjK7ADHTXiyfZm_e161uGLdWAFZ?authuser=2